مقایسهٔ عملگرهای پلاسمای تکی و جت ترکیبی خطی برای کنترل جریان اطراف استوانه*

(یادداشت پژوهشی)

علیرضا گرامی[۱]   سیدمجید ملک جعفریان[۲]

چکیده *در تحقیق حاضر شبیه‌سازی عددی جریان دوبعدی حول یک استوانهٔ مدور و تأثیر استفاده از انواع عملگرهای پلاسما جهت کنترل جریان اطراف آن مورد بررسی قرار گرفته است. عملگرهای مورد استفاده، شامل عملگر پلاسمای تکی و عملگر جت ترکیبی پلاسمای خطی می‌باشند. به‌منظور شبیه‌سازی عددی این عملگرها، از مدل خطی‌شدهٔ نیرو استفاده گردیده است. در کار حاضر، دو موضوع دقت مدل در تحلیل رفتار عملگرهای پلاسما و تأثیر محل قرارگیری این عملگرها بر نقطهٔ جدایش و حذف گردابه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که شبیه‌سازی عملگرها با استفاده از مدل خطی‌شدهٔ نیرو (در عین سادگی) در جدایش جریان به‌لحاظ کیفی به‌صورت موفق عمل می‌کند. استفاده از عملگرهای پلاسمای تکی در زوایای ۴۵± و ۹۰± درجه بهترین وضعیت قرارگیری عملگرها می‌باشد. در صورتی که توان مصرفی کمتر عملگرها (به‌علت تعداد کمتر) و درعین‌حال، بیشترین تأثیر روی جریان مد نظر باشد، محل قرارگیری عملگرها در زوایای ۹۰± درجه توصیه می‌شود. استفاده از عملگر جت ترکیبی پلاسمای خطی در زوایای ۴۵± در این مسئلهٔ به‌خصوص، به‌دلیل تأثیر کمتر روی جریان و همچنین توان مصرفی بالاتر، توصیه نمی‌شود.*

واژه‌های کلیدی کنترل جریان، عملگرهای پلاسما، عملگرهای L-PSJ، مدل خطی‌شدهٔ نیرو، استوانهٔ مدور.

Comparison of Single and L-PSJ DBD Plasma Actuators for Flow Control around a Cylinder

A. Gerami   M. Malek Jafarian

Abstract *In the present study, 2D numerical simulation of flow around a circular cylinder and the effect of plasma actuators to control the flow around it have been investigated. Plasma actuators which have been used include single plasma actuator and Linear Plasma Synthetic Jet Actuator (L-PSJA). In order to numerically simulate the actuators, the linearized force model has been used. In the present work, accuracy of the linearized force model to analysis the plasma actuators behavior and the effect of their position on the point of separation and elimination of the vortices have been investigated. The results show that the simulation of actuators operates qualitatively successful in flow separation using linearized force model (despite of its simplicity). Using of single plasma actuators at angle of ±45 and ±90 degree is the best position of the plasma actuators. The position of the actuators at angel of ±90 degree is recommended, if the lower power consumption of the plasma and at the same time the most influence on the flow is to be considered. Using L-PSJ actuators at angel of ±45 degree is not recommended, due to low influence on the flow and higher power consumption.*

Key Words Flow control, Plasma actuators, L-PSJ actuators, Linearized force model, Circular cylinder.

*تاریخ دریافت مقاله ۹۵/۹/۲۱ و تاریخ پذیرش آن ۹۶/۸/۲۱ می‌باشد. DOI: 10.22067/fum-mech.v30i2.60952

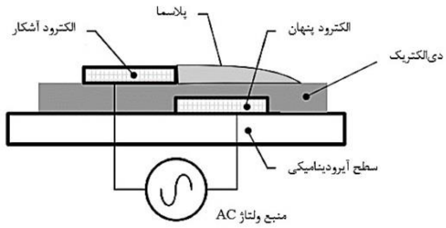
(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

(۲) نویسندهٔ مسئول: دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند mmjafarian@birjand.ac.ir

مقدمه

در سال‌های گذشته روش‌های کنترل فعال جریان در حوزه‌های مختلف، یکی از موضوعات مورد علاقهٔ محققان بوده است. یکی از این روش‌ها، استفاده از عملگر پلاسمای تخلیهٔ الکتریکی با مانع دی‌الکتریک می‌باشد. این وسیله تأثیر زیادی در بهبود عملکرد حالت‌های جریان دارد. تخلیهٔ الکتریکی با مانع دی‌الکتریک، یا به‌صورت ساده‌تر تخلیه با مانع، بیشتر از یک قرن است که شناخته شده است. نخستین تحقیقات آزمایشگاهی در این مورد، در سال ۱۸۵۷ توسط زیمنس [1] و به‌منظور تولید اُزن گزارش شده است. در اواخر دههٔ ۹۰ میلادی شکل جدیدی از این ابزار، با نام عملگر پلاسما معرفی گردید. بر اساس نحوهٔ آرایش و شکل الکترودها، عملگرهای پلاسما به دو دسته تقسیم می‌شوند: ۱- عملگر پلاسمای تکی و ۲- عملگر جت ترکیبی پلاسما.

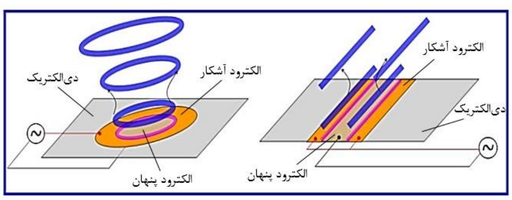
عملگر پلاسمای نشان داده شده در شکل (۱) یک وسیلهٔ نسبتاً ساده، شامل دو الکترود است که به‌وسیلهٔ یک مادهٔ دی‌الکتریک از یکدیگر جدا شده‌اند. معمولاً الکترودها از نوارهای مسی، و دی‌الکتریک از لایهٔ نازک کپتون ساخته می‌شوند. هنگامی‌که یک ولتاژ جریان متناوب با فرکانس بالا از الکترودها عبور کند، هوا در این ناحیه با پتانسیل الکتریکی بالا یونیزه می‌شود. همان‌طور که در شکل (۱) دیده می‌شود، این ناحیه در بالای الکترود نهان و نزدیک به لبهٔ الکترود آشکار قرار دارد. هوای یونیزه‌شده یا پلاسما در حضور یک گرادیان میدان الکتریکی، نیروی حجمی را در هوای محیط ایجاد می‌کند، که جهت آن از الکترود آشکار و موازی با سطح دی‌الکتریک می‌باشد. نیروی ایجادشده توانایی کنترل جریان را در گسترهٔ وسیعی از کاربردهای آیرودینامیکی دارد [2].



شکل ۱ طرحوارهٔ عملگر پلاسمای تکی

به‌منظور یونیزه شدن هوا بااستفاده‌از عملگرهای پلاسما به ولتاژ متناوب بالایی بین ۵ تا ۲۰ کیلو ولت و فرکانس کاری بین ۳ تا ۱۵ کیلو هرتز نیاز است [3]. به‌دلیل بالا بودن فرکانس کاری، عملگرهای پلاسما می‌توانند به عنوان یک وسیلهٔ «شبه پایدار» درنظر گرفته شوند، زیرا این فرکانس به‌اندازهٔ کافی بیشتر از فرکانس واکنش جریان می‌باشد. با وجود این‌که عملگرهای پلاسما برای کار، نیاز به ولتاژ بالایی دارند اما ابزارهای نسبتاً کم‌مصرفی می‌باشند (بین ٦ تا ۱۳۰ وات بر متر به‌ازای هر سیکل کاری عملگر) [2].

عملگر جت ترکیبی پلاسما از لحاظ کارکرد فیزیکی، کاملاً شبیه به عملگرهای پلاسمای مرسوم (تکی) می‌باشد. تفاوت اساسی این عملگرها با نوع تکی در نحوهٔ آرایش و پیکربندی الکترودها بوده که باعث می‌شود جریان ایجادشدهٔ ناشی از آنها به‌صورت یک جت رو به بالا باشد. مفهوم عملگرهای جت ترکیبی پلاسما در اصل به‌وسیلهٔ سانتاناکریشنان و یعقوب در سال ۲۰۰٦ توسعه یافته است [4]. آنها دو نوع عملگر با نام‌های جت ترکیبی خطی و حلقوی (L-PSJA و A-PSJA) را ارائه دادند که در شکل (۲) نشان داده شده است [5].



الف)   ب)

شکل ۲ طرح‌وارهٔ عملگر جت ترکیبی پلاسما.
الف) خطی ب) حلقوی

عملگر L-PSJA شامل دو الکترود آشکار، یک یا دو الکترود پنهان به‌همراه دی‌الکتریک می‌باشد؛ درحالی‌که عملگر A-PSJA شامل یک الکترود آشکار حلقوی، الکترود پنهان و یک ورقه دی‌الکتریک می‌باشد [6]. در هر دو نوع عملگر، الکترود آشکار در کنار الکترود پنهان به‌همراه یک فاصلهٔ کوچک یا بدون فاصله قرار گرفته است [4].

عملگرهای پلاسما مزایای زیادی نسبت به سایر ابزارهای کنترل جریان دارند. از ویژگی‌های این نوع عملگرها می‌توان به نداشتن قطعات متحرک، عدم تأثیر بر جریان به‌علت ضخامت اندک الکترود آشکار، قابلیت پاسخگویی سریع و تأخیر زمانی اندک، سادگی ساختار، مصرف کم انرژی، کاهش هزینه‌های عملیاتی، تعمیر و تکمیل آن‌ها اشاره نمود [۷].

عملگرهای القایی پلاسما را می‌توان بااستفاده‌از روش‌های آزمایشگاهی و عددی شبیه‌سازی نمود. از آنجایی که تحقیقات آزمایشگاهی بر روی عملگرهای پلاسما مستلزم صرف وقت و هزینه‌های بالا می‌باشد، به‌همین‌دلیل محققان بر آن شدند تا بااستفاده‌از روش‌های عددی، پدیدهٔ فیزیکی حاکم بر این نوع عملگرها را مدل‌سازی کنند. مدل‌ها را می‌توان در دو گروه کلی تقسیم‌بندی کرد. ۱- مدل‌های ساده‌شده (پدیدار شناختی) و ۲- مدل‌های اصول مبنا. مدل‌های ساده‌شده، شامل مدل‌های الکترواستاتیک، مدار تجمعی، خطی‌شدهٔ نیرو و جریان پتانسیل می‌باشد. مدل‌های اصول مبنا نیز شامل مدل جنبشی، مدل سیال و مدل هیبرید است. به‌دلیل سادگی و سرعت بالای حل و درعین‌حال دقت قابل‌قبول مدل‌های ساده‌شده، بیشتر تحقیقات عددی انجام‌شده بر روی عملگرهای پلاسما مربوط به این مدل‌ها می‌باشد.

در سال ۲۰۰۲ شی و همکاران [8] بااستفاده‌از نتایج یک آزمایش تجربی توانستند یک روش عددی برای مدل‌سازی عملگر پلاسمای تکی به‌دست آورند که در آن خطوط میدان پتانسیل الکتریکی به‌صورت خطی فرض شده و ناحیهٔ تشکیل پلاسما محدود به ناحیهٔ مثلثی کنار الکترود نهان می‌باشد. مفهوم مدل‌سازی عملگر پلاسما به‌عنوان یک مدل الکتریکی (مدار تجمعی)، در ابتدا به‌وسیلهٔ انلو و همکاران در سال ۲۰۰٤ ارائه شد. سوزان و همکاران [9] در سال ۲۰۰۵، مدل عددی دیگری برای عملگرهای پلاسما ارائه کردند. در این روش از معادلات ماکسول و قانون گوس برای مدل‌سازی میدان پتانسیل الکتریکی استفاده شد. در سال ۲۰۰٦ ارلوف و همکاران [10] مدل مدار الکتریکی انلو را گسترش داده و ضرایب آن را بهبود بخشیدند؛ در این مدل، مادهٔ دی‌الکتریک و مولکول‌های هوا به‌صورت مجموعه‌ای از خازن و مقاومت درنظر گرفته می‌شوند.

از جمله کاربردهای عملگر پلاسما، می‌توان به این موارد اشاره کرد: کاهش پسا و افزایش نیروی برآ بر روی ایرفویل [11,12,13,14,15]، کاهش سر و صدای ناشی از گردابه‌های ایجاد شده بر اثر چرخش پره‌های کمپرسور و فن [16]، بهبود کیفیت احتراق و انتقال حرارت داخل محفظهٔ احتراق توربین گاز [۱۷]، افزایش عملکرد توربین‌های بادی [18,19] و کنترل جریان اطراف استوانه [20-25].

مزایای کنترل جریان بر روی استوانه شامل کاهش لرزش، صدا و پسا و افزایش برآ، اختلاط و انتقال حرارت می‌باشد. بررسی‌های نویسندگان در زمینهٔ کنترل جریان حول استوانه بااستفاده‌از عملگرهای پلاسما نشان می‌دهد که کارهای انجام گرفته در این زمینه عمدتاً به‌صورت آزمایشگاهی می‌باشد که در ادامه به چند مورد اشاره می‌گردد. سانتاناکریشنان و همکاران [5] کاربرد عملگرهای پلاسما را در کنترل جریان با اعداد رینولدز پایین، بر روی صفحهٔ صاف و استوانهٔ مدور مورد بررسی قرار دادند. توماس و همکاران [20] استفاده از عملگرهای پلاسما جهت کنترل جدایش جریان و گردابه‌های ایجادشده بر روی استوانهٔ مدور را مورد بررسی قرار دادند. هدف از این کار، تأثیر استفاده

از ایـن عملگرهـا در کـاهش صـدا هنگـام فـرود هواپیماهای تجاری بوده است. سوسا و همکـاران [21] کـاهش ضـریب پسـا روی استوانه را بااسـتفاده‌از سـه عملگر پلاسمای تکی مورد بررسی قـرار دادنـد. نتـایج آن‌ها نشان داد که عملگرها می‌توانند ضریب پسا را تـا حدود ۲۵ درصد کاهش دهند. طباطبائیـان و همکـاران [22] تأثیر وجود عملگرهـای پلاسـما و آرایـش آن‌هـا به‌منظـور کنتـرل جریـان حـول استوانه را بـه‌صـورت آزمایشگاهی بررسی کردند. در این آزمایش الکترودهـا به منبع ولتـاژ بـالای DC متصـل شـده‌انـد. کوپیـف و همکاران [23] به مطالعهٔ تأثیر عملگرهای فرکانس بـالا روی صدای اطراف سیلندر پرداختند. نتایج آن‌ها نشـان داد کـه عملگرهـای پلاسـما توانـایی کـاهش صـدای گردابـه‌هـای اطـراف سـیلندر را در طیـف وسـیعی از سرعت‌های معمول کاربردهای آیرواستاتیک دارد. اما از معدود کارهای عددی می‌توان به کارهای کیم و وانـگ [24] و اسکات و همکاران [25] اشاره کرد. در کارهای فوق به‌ترتیب از عملگرهـای پلاسـمای تکـی و L-PSJ به‌کمک مدل سـوزان و هوآنـگ جهـت کنتـرل جریـان حول استوانه استفاده شده است.

هدف از این تحقیق، شـبیه‌سـازی عـددی جریـان اطراف استوانه و بررسی تـأثیر اسـتفاده از عملگرهـای پلاسما (شامل تکـی و L-PSJ) بـرای کنتـرل جریـان و حـذف گردابـه‌هـای ایجادشـده در پشـت اسـتوانه بااستفاده‌از نرم‌افزار انسیس فلوئنت می‌باشد. بـرای ایـن منظـور، نیـروی حجمـی ناشـی از عملگـر پلاسـما بااستفاده‌از مدل خطی‌شدهٔ نیرو شبیه‌سازی گردیده و از طریق کد UDF به‌عنـوان جملـهٔ چشـمه بـه معـادلات ممنتوم در فلوئنت افزوده می‌شود.

معادلات حاکم

معادلات حاکم بر جریان، شامل معـادلات بقـای جـرم (پیوستگی)، بقای ممنتوم و معادلات اغتشاش می‌باشند. این معادلات، دو بعـدی، تـراکم‌ناپـذیر و ناپایـا درنظر گرفته شده است. به‌دلیل این‌که پلاسـمای تشـکیل‌شـده در عملگرهای دی‌الکتریک، از نوع سـرد بـوده و تـأثیر چنـدانی روی میـدان دمـا نـدارد، بنـابراین در تمـامی حالـت‌هـای مـورد بررسـی، از حـل معادلـهٔ انـرژی صرف‌نظر شده است.

معادلهٔ پیوستگی. معادلهٔ بقای جرم یا پیوستگی، بـرای جریان تراکم‌ناپذیر به‌صورت زیر است:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{۱}$$

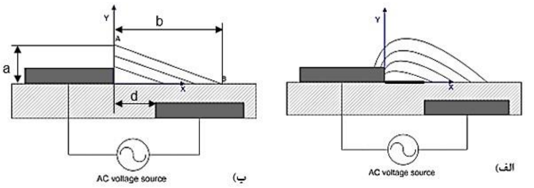
معادلات ممنتوم. معـادلات ممنتـوم در یـک دسـتگاه مرجع ساکن (لخت) برای جریان تراکم‌ناپـذیر و ناپایـا به‌صورت زیر توصیف می‌شوند:

$$\rho\left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(u_i u_j)\right) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\mu_{eff}\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right) + F_{P_i} \tag{۲}$$

F_{P_i} در رابطهٔ فوق همان نیروی حجمی ایجاد شـده بـه‌وسـیلهٔ عملگـر پلاسـما بـوده کـه توسـط یکـی از روش‌های مدل‌سازی، محاسبه و بـه معـادلات ممنتـوم افزوده می‌شود.

معـادلات اغتشـاش. مـدل اغتشاشـی $k - \varepsilon$ یکـی از رایـج‌تـرین مـدل‌هـای مـورد اسـتفاده در CFD در شبیه‌سازی مسائل رژیم جریان مغشوش می‌باشـد. ایـن مـدل شـامل معـادلات انتقـال بـرای انـرژی جنبشـی مغشـوش (k) و نـرخ اتـلاف آن (ε) اسـت. پایـداری، اقتصادی‌بودن و دقت قابل‌قبول برای محـدودهٔ وسـیعی از جریان‌های مغشوش، این مدل را بـرای شـبیه‌سـازی مسائل سیالاتی صرف و مسائل انتقال حرارتی مناسـب می‌سازد.

مدل خطی‌شدهٔ نیرو. یکی از اولین مدل‌های پیشنهادی عملگر پلاسما، مدل خطی‌شدهٔ نیرو می‌باشد که در سال ۲۰۰۲ توسط شی و همکاران [8] پیشنهاد شد. در این مدل میدان الکتریکی به‌صورت خطوط موازی با هم فرض شده و ناحیهٔ تشکیل پلاسما محدود به ناحیهٔ مثلثی در کنار الکترود آشکار می‌باشد (شکل ۳).



شکل ۳ الف) عملگر پلاسما با حدود واقعی شکل خطوط میدان الکتریکی ب) عملگر پلاسما با شکل خطی‌شدهٔ میدان الکتریکی

میدان الکتریکی E، از لحاظ ریاضی به‌شکل زیر نوشته می‌شود:

$$\left|\vec{E}\right| = E_0 - k_1 x - k_2 y \qquad (۳)$$

در رابطهٔ بالا، E_0 میدان الکتریکی در ناحیهٔ تیره‌رنگ شکل (۳) بوده و از رابطهٔ زیر محاسبه می‌شود:

$$E_0 = \frac{V}{d} \qquad (٤)$$

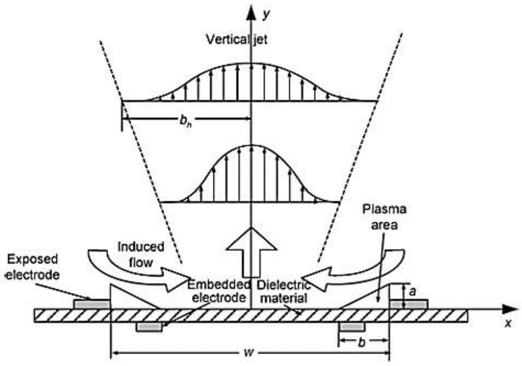
که V دامنهٔ ولتاژ AC اعمال‌شده، و d فاصلهٔ بین دو الکترود در راستای x است. مقادیر k_1 و k_2 ثابت‌های هندسی هستند که نشان‌دهندهٔ شیب شدت میدان الکتریکی در راستای دو جهت عمود بر هم یعنی x و y می‌باشند و می‌توان آن‌ها را به‌ترتیب بااستفاده‌از روابط زیر محاسبه نمود.

$$k_1 = \frac{E_0 - E_b}{b} \qquad (٥)$$

$$k_2 = \frac{E_0 - E_b}{a} \qquad (٦)$$

پارامتر E_b در رابطهٔ فوق، قدرت شکست میدان الکتریکی و مقادیر a و b به‌ترتیب ارتفاع و عرض ناحیهٔ تشکیل پلاسما (شکل ۳- ب) می‌باشند.

روابط حاکم بر مدل خطی‌شدهٔ نیرو، برای عملگر جت ترکیبی پلاسمای خطی، همانند عملگر پلاسمای تکی می‌باشد. با این تفاوت که در این نوع عملگر فرض می‌شود که نیروی الکتریکی ناشی از تشکیل پلاسما، در دو ناحیهٔ مثلثی‌شکل عمل می‌کند (شکل ٤).



شکل ٤ طرح‌وارهٔ عملگر L-PSJ و میدان جریان ناشی از آن

با توجه‌به شکل فوق، میدان الکتریکی ناشی از پلاسما در ناحیهٔ سمت چپ، می‌تواند به‌صورت رابطهٔ زیر نوشته شود:

$$\left|\vec{E}\right|_L = E_L(x, y) = E_0 - k_1(x + 0.5w) - k_2 y \qquad (٧)$$

به طور مشابه، میدان الکتریکی در ناحیهٔ سمت راست را می‌توان به‌صورت زیر محاسبه نمود:

$$\left|\vec{E}\right|_R = E_R(x, y) = E_0 + k_1(x - 0.5w) - k_2 y \qquad (٨)$$

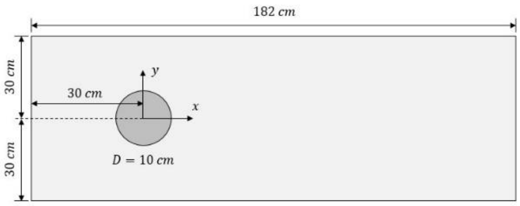
که w فاصلهٔ بین لبه‌های بیرونی نواحی پلاسمای ایجادشده می‌باشد.

در نهایت می‌توان نیروی حجمی حاصل از پلاسما را بااستفاده‌از روابط (۳ تا ۸) به‌صورت زیر محاسبه نمود. اثر نیروی حجمی ناشی از پلاسما می‌تواند به‌عنوان یک جملهٔ چشمه به معادلات ناویر–استوکس افزوده شود.

$$\vec{F}_{P_{x,y}} = \nu\alpha\rho_c e_c \Delta t \vec{E}_{x,y}\delta \quad (۹)$$

هندسهٔ مسئله و شبکهٔ محاسباتی

فضای نمونهٔ مورد استفاده در این شبیه‌سازی، مطابق با ابعاد تونل آزمایشگاهی مورداستفاده در مرجع [20] یک ناحیهٔ مستطیلی با ابعاد ۶۰×۱۸۲ سانتی‌متر بوده که استوانه‌ای به قطر ۱۰ سانتی‌متر در فاصلهٔ ۳۰ سانتی‌متر از مرز ورودی درون این ناحیه قرار گرفته است (شکل ۵).



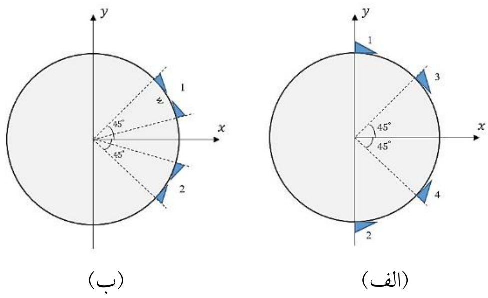
شکل ۵ ابعاد دامنهٔ محاسباتی و محل قرارگیری استوانه در دامنهٔ حل

شبیه‌سازی عملگرها بااستفاده‌از مدل خطی‌شدهٔ نیرو، در حالت عملگر دائمی (همیشه روشن) انجام گرفته و نتایج حاضر با داده‌های تجربی کار توماس و همکاران [20] مقایسه گردیده است. در مرجع [20] تأثیر استفاده از عملگرهای پلاسما روی استوانه (محور چرخ‌های هواپیما) به‌منظور کاهش صدا به‌هنگام فرود هواپیماهای تجاری مورد بررسی قرار گرفته است. موضوعات مورد بررسی در کار حاضر شامل تأثیر محل قرارگیری عملگرها و نحوهٔ آرایش الکترودها بر نقطهٔ جدایش و حذف گردابه‌ها می‌باشد. بر طبق اطلاعات نویسندگان مقاله، تاکنون شبیه‌سازی عددی عملگرهای پلاسما (تکی و L-PSJ) بااستفاده‌از مدل خطی‌شدهٔ نیرو به‌منظور کنترل جریان روی استوانه ارائه نشده است. برای این منظور چهار حالت کلی انتخاب گردیده که در جدول (۱) به آن اشاره می‌شود.

جدول ۱ حالت‌های مورد بررسی در شبیه‌سازی عملگرهای پلاسما برای کنترل جریان اطراف استوانه

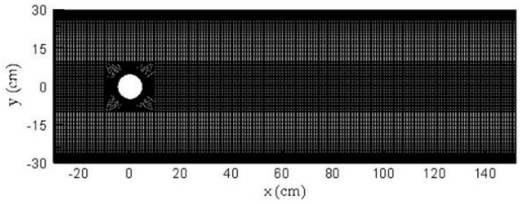
	تعداد عملگرها	نوع عملگرها	محل قرارگیری عملگرها
حالت اول	٤	تکی	±٤٥ و ±۹۰
حالت دوم	۲	تکی	±۹۰
حالت سوم	۲	تکی	±٤٥
حالت چهارم	۲	L-PSJ	±٤٥

شکل (٦– الف)، نواحی پلاسمای تشکیل‌شده توسط عملگرها (عملگر تکی) در حالت‌های اول، دوم و سوم از جدول (۱) را که شامل چهار ناحیهٔ مثلثی در زوایای ±٤٥ و ±۹۰ با عرض و ارتفاع به‌ترتیب a=۱/٥ mm و b=۳ mm می‌باشد، نشان می‌دهد. این نواحی توسط کد نوشته شده در برنامهٔ UDF، روی استوانه قرار می‌گیرند. در حالت چهارم (شکل ٦– ب) که از عملگر L-PSJ برای کنترل جریان استفاده شده، عرض و ارتفاع نواحی مثلثی شکل، برابر با سه حالت اول در نظر گرفته شده است. همچنین فاصلهٔ بین لبه‌های بیرونی نواحی پلاسما برابر با b =۱۲ mm و w= ٤ می‌باشد.



شکل ٦ محل قرارگیری عملگرهای پلاسما روی استوانه الف) حالت‌های اول دوم و سوم ب) حالت چهارم

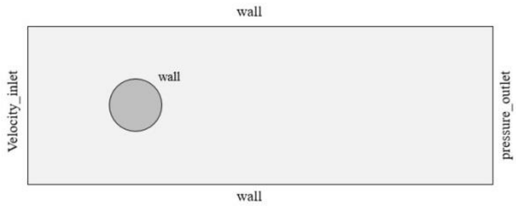
شبکه‌بندی فضای نمونه برای تمامی حالت‌های ذکرشده به‌صورت غیریکنواخت و بااستفاده‌از نرم‌افزار ANSYS Meshing انجام گرفته است (شکل ۷). همچنین برای به‌دست آوردن حل منطقی در لایهٔ مرزی و ناحیهٔ پلاسما (سطح استوانه)، تمرکز سلول‌ها در ناحیهٔ نزدیک به دیواره‌های بالا و پایین و سطح روی استوانه افزایش یافته به‌طوری‌که y^+ روی سطح کمتر از پنج باشد.



شکل ۷ شبکه‌بندی فضای نمونه

شرایط مرزی و تنظیمات عددی

حل میدان پلاسما و محاسبهٔ نیرو بااستفاده‌از مدل خطی‌شدهٔ نیرو، نیاز به شرط مرزی ندارد و شرایط مرزی تنها برای حل میدان جریان استفاده می‌شود. این شرایط مرزی نیز در تمامی حالت‌های ذکرشده در جدول (۱) مشابه بوده که در شکل (۸) نشان داده شده است.



شکل ۸ شرایط مرزی برای حل میدان جریان روی استوانه در انسیس فلوئنت

پارامترهای ورودی مورد نیاز برای شبیه‌سازی عملگرهای پلاسما در جدول (۲) آورده شده است. توجه شود که در مرز ورودی، جریان توسعه‌یافته فرض شده است. سرعت جریان ورودی ٤ m/s و عدد رینولدز (بر اساس قطر استوانه) برابر با ۳۳۰۰۰ می‌باشد. حل‌گر مورد استفاده از نوع فشار-مبنا و الگوریتم PISO برای اصلاح رابطهٔ بین فشار و سرعت به‌خدمت گرفته شده است. جملات معادلات ممنتوم، انرژی جنبشی اغتشاشات (k) و نرخ اتلاف مخصوص (ε) با استفاده از طرح مرتبه دوم بالادست، گسسته‌سازی شده‌اند. معیار همگرایی برای معادلات پیوستگی و ممنتوم از مرتبهٔ $۱۰^{-۶}$، گام زمانی مناسب برای حل میدان جریان ۰/۰۰۵ ثانیه و بیشینهٔ تعداد تکرارها به‌ازای هر گام زمانی، ٤۰ درنظر گرفته شده است.

جدول ۲ پارامترهای ورودی مورد نیاز برای شبیه‌سازی عملگرهای پلاسما با استفاده از مدل خطی‌شدهٔ نیرو در حالت‌های اول تا چهارم

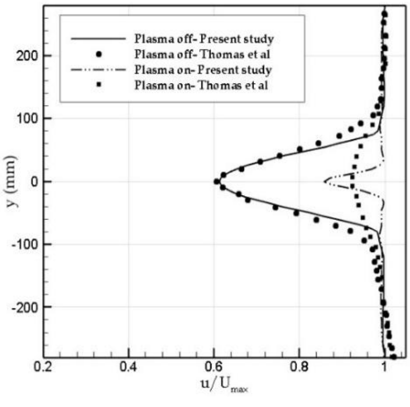
V_{in} (V)	ν (KHz)	E_b (V/m)	Δt (μs)	d (mm)
۱۱/٥	۱۰	$۳×۱۰^{۶}$	۳	۰/۲٥

نتایج

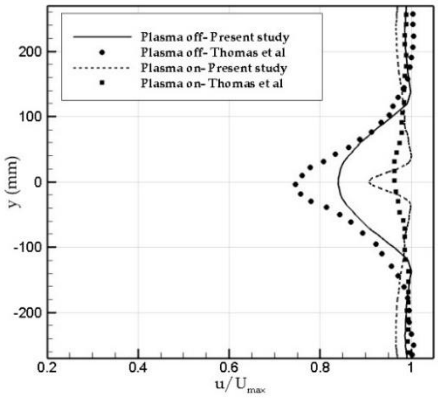
در این بخش، به ارائهٔ نتایج حاصل از شبیه‌سازی جریان حول استوانه و نقش عملگرهای پلاسما در کنترل جریان اطراف آن پرداخته می‌شود. به‌همین‌منظور در ابتدا، نتایج وضعیت پلاسما خاموش و حالت اول با داده‌های مرجع [20] مورد مقایسه قرار گرفته (اعتبارسنجی نتایج) و سپس نتایج برای سایر حالت‌ها ارائه می‌گردد. لازم به ذکر است که نتایج مربوط به حالت‌های دوم، سوم و چهارم در مرجع [20] وجود ندارد و برای اولین بار در تحقیق حاضر مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین توجه شود که نتایج مربوط به توزیع نمایه‌های سرعت افقی (u) در تمامی حالت‌ها، به‌صورت متوسط‌گیری‌شدهٔ زمانی و در موقعیت‌های x/D=۲ و x/D=٤ (اندازه‌گیری‌شده از پشت استوانه)، گزارش شده است.

در کنار نقش عملگرهای پلاسما در کنترل جریان، میزان مصرف انرژی آن‌ها نیز باید مـورد بررسـی قـرار گیرد. مصرف انـرژی، رابطـهٔ مسـتقیمی بـا پارامترهـای ورودی نظیر ولتاژ و تعداد عملگرها دارد. از آنجایی که در تحقیـق حاضـر، پارامترهـای ورودی بـرای تمـامی عملگرهای پلاسما یکسان درنظر گرفته شـده، بنـابراین مصرف انرژی وابسته به تعداد عملگرهای مورداسـتفاده است. از این رو طراح همزمان بـا کنتـرل جریـان بایـد مصرف انرژی عملگر را نیز مد نظر قرار دهد.

در شکل (۹)، نتـایج شـبیه‌سـازی حاضـر بـا کـار توماس و همکاران [20] مورد مقایسه قرار گرفته است. مشاهده می‌شود که در حالت پلاسـما خـاموش، نتـایج مطابقت نسبتاً خوبی با مرجع [20] دارند. درحـالتی‌کـه تمامی عملگرهای پلاسما روشن هستند (حالـت اول از جدول ۱)، نتایج به‌لحاظ کیفی به نتایج تجربی نزدیـک شده است، اما از لحاظ کمّی این نتایج با مقادیر تجربی متفاوت است. بااین‌وجود مشاهده می‌شـود کـه نیـروی حاصل از عملگرهای پلاسما توانسته سرعت جریان در پشت استوانه را تا حد زیادی نسبت به حالـت پلاسـما خاموش افزایش دهد و از برگشـت جریـان جلـوگیری کنـد. تفـاوت نتـایج کـار حاضـر بـا داده‌هـای تجربـی می‌تواند به‌دلیل ساده‌سازی‌هـای انجـام گرفتـه در مـدل خطی‌شدهٔ نیرو و پیچیدگی‌های جریان در پشت استوانه باشد.



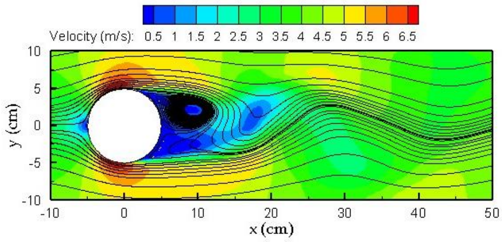
الف)



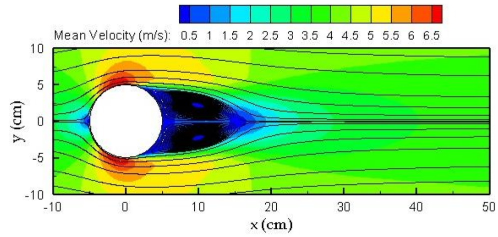
ب)

شکل ۹ مقایسهٔ نمایه‌های سرعت متوسط برای وضعیت پلاسما خاموش و روشن در حالت اول. الف) x/D=۲ ب) x/D=٤

توزیع میدان سرعت در یک زمان خاص از حـل و متوسط‌گیری‌شدهٔ آن در یک دورهٔ زمانی (برای وضعیت پلاسـما خـاموش و چهـار حالـت مـورد بررسـی) در شکل‌های (۱۰ تـا ١٤) ارائـه شـده اسـت. در وضـعیت پلاسما خاموش، طول ناحیهٔ جدایش به حدود ۲ برابـر شعاع استوانه می‌رسد و گردابه‌های ایجاد شده در پشت استوانه به‌خوبی قابـل مشـاهده مـی‌باشـد (شـکل ۱۰). درحالتی‌که هر چهـار عملگـر پلاسـما روشـن هسـتند (حالت اول) به‌علت تزریق ممنتوم از لایـه‌هـای بـالایی جریان به لایـهٔ مـرزی توسـط عملگرهـا، گردابـه‌هـای ایجادشده در پشت استوانه حذف شده و ناحیهٔ جدایش محدود به ناحیهٔ بسـیار کوچـک در پشـت آن گردیـده است (شکل ۱۱). در حالت دوم که عملگرهای پلاسما واقع در زوایای ۹۰± روشن هستند (شکل ۱۲)، طول و پهنای ناحیهٔ جدایش و همچنین اندازهٔ گردابه‌ها، نسبت به حالت پلاسما خاموش (شـکل ۱۰)، کـوچکتر شـده است. علاوه بر این جدایش جریان نیز به تـأخیر افتـاده است. در حالت سوم اسـتفاده از عملگرهـا در زوایـای ٤٥± تأثیر چندان زیادی روی گردابه‌ها و ناحیهٔ جدایش نداشته است (شکل ۱۳). استفاده از دو عملگـر L-PSJ در زوایای ٤٥±(حالت چهارم) منجربـه کـاهش انـدک طول ناحیهٔ جدایش شده است (شکل ١٤).

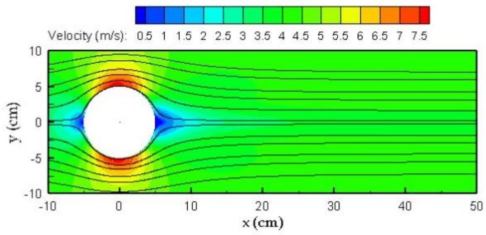


الف)

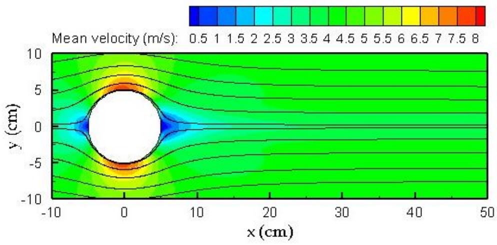


ب)

شکل ۱۰ میدان سرعت و خطوط جریان در حالت پلاسما خاموش. الف) در زمان t=۱/۸۸۵ s ب) متوسط‌گیری‌شده در یک تناوب کامل

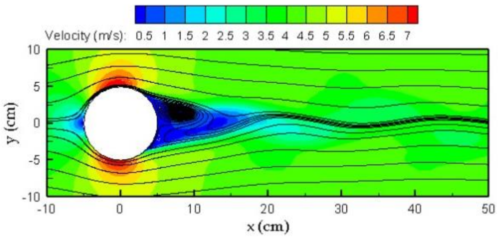


الف)

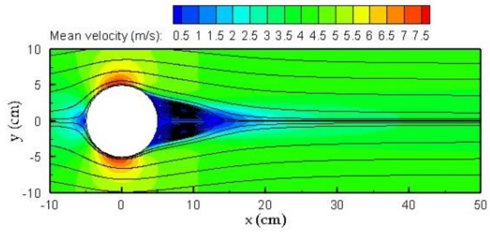


ب)

شکل ۱۱ میدان سرعت و خطوط جریان برای حالت اول. الف) در زمان t=۲/۸۹۵ s ب) متوسط‌گیری‌شده در یک تناوب کامل

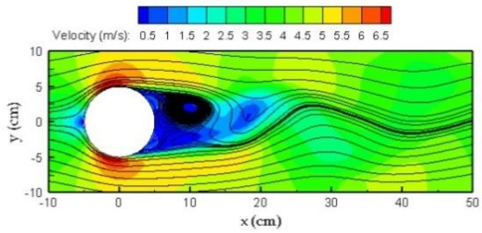


الف)

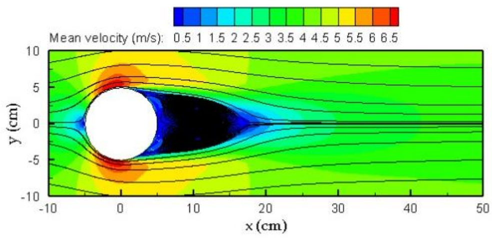


ب)

شکل ۱۲ میدان سرعت و خطوط جریان برای حالت دوم. الف) در زمان t=۲/۸۷۵ s ب) متوسط‌گیری‌شده در یک تناوب کامل

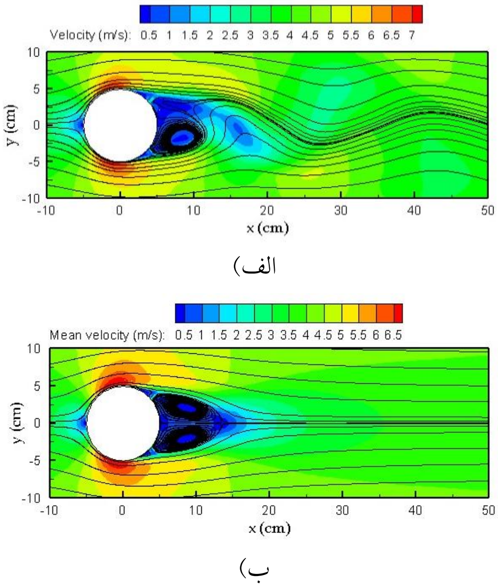


الف)



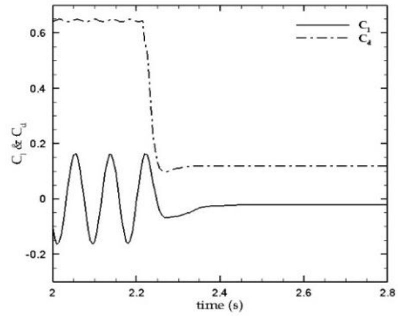
ب)

شکل ۱۳ میدان سرعت و خطوط جریان برای حالت سوم الف) در زمان t=۲/۹۳۵ s ب) متوسط‌گیری‌شده در یک تناوب کامل



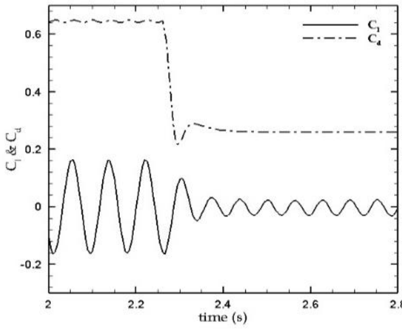
شکل ۱٤ میدان سرعت و خطوط جریان برای حالت چهارم
الف) در زمان t=۳/۳۳ s ب) متوسط‌گیری‌شده
در یک تناوب کامل

نتایج مربوط‌به تغییرات ضرایب برآ و پسا برای حالت‌های اول تا چهارم در شکل‌های (۱۵ تا ۱۸) نشان داده شده‌اند.



شکل ۱۵ نمایه‌های ضریب برآ و پسا برای حالت اول

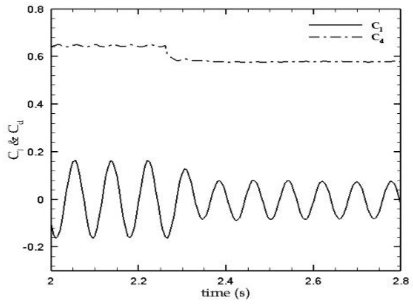
در حالت اول پس از فعال‌سازی عملگرها و تأثیر آن‌ها روی جریان، به‌دلیل حذف گردابه‌ها و ناحیهٔ جدایش، ضریب برآ از حالت نوسانی خارج شده و ثابت می‌شود. در این حالت مقدار ضریب پسا نیز به‌شدت افت کرده و از حدود ۰/٦۵ به ۰/۱ می‌رسد (شکل ۱۵).



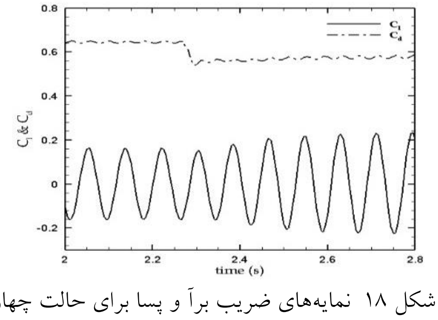
شکل ١٦ نمایه‌های ضریب برآ و پسا برای حالت دوم

در حالت دوم پس از فعال‌سازی پلاسما، به‌دلیل کوچک‌تر شدن ناحیهٔ جدایش، دامنهٔ نوسانات از مقدار ±۰/١٦ به حدود ±۰/۰۲ کاهش و فرکانس آن افزایش می‌یابد. در این وضعیت، ضریب پسای جریان، به‌علت وجود گردابه‌ها در پشت استوانه، افت کمتری را نسبت به حالت اول تجربه می‌کند (شکل ١٦).

در حالت سوم به‌دلیل این‌که عملگرهای پلاسما تأثیر کمی روی ناحیهٔ جدایش داشته، دامنهٔ نوسانات ضریب برآ حدوداً نصف می‌شود. همچنین دیده می‌شود که ضریب پسا به مقدار کمی کاهش می‌یابد (شکل ۱۷).



شکل ۱۷ نمایه‌های ضریب برآ و پسا برای حالت سوم



شکل ۱۸ نمایه‌های ضریب برآ و پسا برای حالت چهارم

پس از فعال‌سازی عملگرهای L-PSJ در حالت چهارم، دامنهٔ نوسانات جریان در پشت استوانه، نسبت به حالت بدون عملگر، افزایش می‌یابد. درعین‌حال به‌دلیل کوچکتر شدن ناحیهٔ جدایش، ضریب پسا مقدار اندکی افت پیدا کرده و حالت نوسانی با دامنهٔ کوچک خود را حفظ می‌کند (شکل ۱۸).

نتایج فوق (میدان‌های سرعت و ضرایب برآ و پسا) نشان می‌دهند که موقعیت قرارگیری عملگرهای پلاسما و نوع آن، تأثیر زیادی روی ناحیهٔ جدایش و گردابه‌های ایجادشده در پشت استوانه می‌گذارد.

باتوجه‌به آنچه که قبلاً اشاره شد، مقایسهٔ نمایه‌های ضرایب برآ و پسا برای هر کدام از حالت‌ها، نشان می‌دهد که بهترین محل قرارگیری عملگرهای پلاسما به‌لحاظ کنترل جریان و همچنین مصرف کمتر انرژی، استفاده از دو عملگر در زوایای ۴۵± (حالت دوم) می‌باشد.

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر شبیه‌سازی عددی جریان دوبعدی حول یک استوانهٔ مدور و تأثیر استفاده از عملگرهای پلاسما (شامل تکی و L-PSJ) برای کنترل جریان در پشت استوانه مورد بررسی قرار گرفت. عملگرهای پلاسما بااستفاده‌از مدل خطی‌شدهٔ نیرو شبیه‌سازی گردید و نتایج حاصل با داده‌های تجربی مرجع [20] موردمقایسه قرار گرفت. سپس تأثیر محل قرارگیری این عملگرها بر نقطهٔ جدایش و حذف گردابه‌ها در چهار حالت مورد بررسی قرار گرفت. خلاصهٔ نتایج به‌دست آمده عبارتست از:

- اعتبارسنجی و مقایسهٔ نتایج تحقیق حاضر با داده‌های مرجع [20] نشان می‌دهد که شبیه‌سازی عملگرها در جدایش جریان بااستفاده‌از مدل خطی‌شدهٔ نیرو (در عین سادگی) به‌لحاظ کیفی به‌صورت موفق عمل کرده است.
- استفاده از عملگرهای پلاسما در حالتی که دو عملگر تکی در موقعیت‌های ۹۰ و ۴۵ (حالت اول) درجه در بالا و پایین ناحیهٔ پشتی سیلندر قرار گیرد، به‌علت حذف گردابه‌های ایجادشده و کاهش ضریب پسا، بهترین وضعیت قرارگیری عملگرها می‌باشد.
- در صورتی که توان مصرفی کمتر عملگرها و درعین‌حال بیشترین تأثیر روی جریان مدنظر باشد، محل قرارگیری عملگرها در حالت دوم (دو عملگر پلاسمای تکی در زوایای ۹۰± درجه) توصیه می‌شود. در این وضعیت گردابه‌ها تا حد زیادی حذف شده و جدایش جریان به تأخیر می‌افتد که کاهش پسا را به دنبال دارد.
- وضعیت قرارگیری عملگرهای پلاسما در حالت سوم (دو عملگر تکی در زوایای ۴۵± درجه)، تأثیری چندانی روی ناحیهٔ جدایش و ضریب پسا ندارد.
- استفاده از عملگرهای L-PSJ (حالت چهارم) در زوایای ۴۵± در این مسئلهٔ به‌خصوص، به‌دلیل تأثیر کمتر روی جریان و همچنین توان مصرفی بالاتر، توصیه نمی‌شود.

فهرست علائم

$\vec{F}_B$	نیروی حاصل از عملگر پلاسما در واحد حجم، (N/m^3)
$\vec{E}$	میدان الکتریکی، (N/C) یا (V/m)
E_b	قدرت شکست میدان الکتریکی، (V/m)
F_P	نیروی حجمی ناشی از پلاسما در واحد حجم، (N/m^3)
k_1 , k_2	ثابت‌های هندسی، (V/m)
u_i	سرعت در راستای x (m/s)
u'_i	سرعت جریان مغشوش، (m/s)
x_i	جهت مختصاتی، (m)

Δt	زمان تشکیل پلاسما، (s)
P	فشار استاتیک، (Pa)
V	دامنهٔ ولتاژ، (V)
a, b	عرض و ارتفاع ناحیهٔ تشکیل پلاسما، (m)
d	فاصلهٔ افقی بین دو الکترود، (m)
e_c	بار اولیه، C $^{-۱۹}$۱/۶۰۲×۱۰، (C)
k	انرژی جنبشی مغشوش، (m^2/s^2)

علائم یونانی

μ_t	لزجت مغشوش، (kg/m.s)
ρ_c	چگالی بار الکترون، ^{۱۱}۱×۱۰ $/cm^3$، ($1/m^3$)
α	فاکتور محاسبهٔ بازخورد، (بی‌بعد)
δ	تابع دلتای کرونیکر، (بی‌بعد)
μ	لزجت دینامیکی ($kgm^{-1}s^{-1}$)
ν	فرکانس ولتاژ اعمالی، (1/s) یا (Hz)
ρ	چگالی (kgm^{-3})

زیرنویس‌ها

b	شکست
i , j	شمارنده
t	مغشوش

واژه‌نامه

عملگر پلاسمای تخلیه الکتریکی با مانع دی‌الکتریک	Dielectric barrier discharge plasma actuator
عملگر پلاسمای تکی	Single plasma actuator
عملگر جت ترکیبی خطی پلاسما	Linear Plasma Synthetic Jet Actuator (L-PSJA).
کنترل جریان	Flow control
مدل خطی‌شدهٔ نیرو	Linearized force model

مراجع

1. Siemens, W., "Annual Review of Physical Chemistry", 102, 66, (1857).
2. West, T.K. and Hosder, S., "Numerical investigation of plasma actuator configurations for flow separation control at multiple angles of attack", *International Journal of Flow Control*, Vol. 5, pp. 25-46, (2013).
3. Orlov, D.M., "Modelling and simulation of single dielectric barrier discharge plasma actuators", PhD dissertation, University of Notre Dame, (2006).
4. Santhanakrishnan, A. and Jacob, J.D., "On plasma synthetic jet actuators", *44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, No. 0317, Reno, N.V., (Jan. 9-12, 2006).
5. Santhanakrishnan, A., Jacob, J.D. and Suzen, Y.B., "Flow control using plasma actuators and linear/annular plasma synthetic jet actuators", *3rd AIAA Flow Control Conference*, No. 3033, San Francisco, (Jun. 5-6, 2006).
6. Santhanakrishnan, A., Reasor, D. and LeBeau, R., "Unstructured numerical simulation of experimental linear plasma actuator synthetic jet flows", *AIAA Paper*, No. 541, Reno, N.V., (Jan. 7-10, 2008).
7. سلماسی، عاطفه، شادآرام، عبدالله، میرزایی، مسعود، شمس طالقانی، آرش "بررسی عددی و تجربی اثر یک عملگر پلاسمایی بر کارایی ایرفویل NLF0414 در زوایای حمله پس از واماندگی،" مهندسی مکانیک مدرس، دورهٔ ۱۲، ص‌ص ۱۱۶-۱۰۴، (۱۳۹۱).
8. Shyy, W., Jayaraman, B. and Andersson, A., "Modeling of glow discharge-induced fluid dynamics", *Journal of Applied Physics*, Vol. 92, No. 11, pp. 6434-6443, (2002).

9. Suzen, Y., Huang, P., Jacob, J. and Ashpis, D., "Numerical simulations of plasma based flow control applications", *AIAA paper*, 35th Fluid Dynamics Conference and Exhibit, No. 4633, Toronto, Ontario, (June 6-9, 2005).
10. Orlov, D., Corke, T. and Patel, M., "Electric Circuit Model for Aerodynamic Plasma Actuator ", *44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, No. 1206, Reno, Nevada, (9 - 12 January 2006).
11. Abdollahzadeh, M., Páscoa, J. and Oliveira, P., "Numerical modelling of boundary layer control using dielectric barrier discharge", *MEFTE IV National Conference on Fluid Mechanics, Thermodynamics and Energy*, Lisbon, LNEC, (May 28 -29, 2012).
12. Khoshkhoo, R. and Jahangirian, A., "Flow separation control over airfoils using DBD plasma body force", *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, pp. 1-13, (2014).
13. Zhang, P.F., Liu, A.B. and Wang, J.J., "Aerodynamic Modification of NACA 0012 Airfoil by Trailing-Edge Plasma Gurney Flap", *AIAA Journal*, Vol. 47, pp. 2467-2474, (2009).
14. MahboubiDoust, A., Ramiar, A. and Dardel, M., "Numerical investigation of plasma actuated and non-actuated Gurney flaps on aerodynamic characteristics of a plunging airfoil", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: *Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 230, pp. 1423-1437, (2016).

۱۵. میرزایی، سعید و پسندیده فرد، محمود، "شبیه سازی عددی چند ساختار از عملگرهای پلاسما و ارزیابی عملکرد آن ها بر روی ایرفویل های NACA 0012 و NACA 0015 "، نشریه مهندسی هوانوردی، دوره ١٦ شماره ١، ص‌ص ٩٤-٧٥، (١٣٩٣).

16. Lemire, S.B. and Vo, H.D., "Reduction of Fan and Compressor Wake Defect Using Plasma Actuation for Tonal Noise Reduction", *Journal of Turbomachinery*, Vol. 133, No. 011017, (2011).

۱۷. ابراهیمی فردویی، اسماعیل، مراد، محمد رضا و پاینده، محمد، "مدل‌سازی عددی اثر عملگر پلاسما بر میدان دما و سرعت احتراق آشفته متان و هوا"، دومین همایش ملی انتقال حرارت و جرم ایران، (١٣٩٣).

18. Greenblatt, D., Schulman, M. and Ben-Harav, A., "Vertical axis wind turbine performance enhancement using plasma actuators", *Renewable Energy*, Vol. 37, pp. 345-354, (2012).

۱۹. ابراهیمی، عباس، موحدی، محمد رضا، "اثر عملگر کنترل جریان پلاسما در بهبود عملکرد آیرودینایکی روتور توربین باد مگاواتی"، دورهٔ ١٦، شماره ١٢، ص‌ص ٥١٧-٥٠٩، (١٣٩٥).

20. Thomas, F.O., Kozlov, A. and Corke, T.C., "Plasma actuators for cylinder flow control and noise reduction", *AIAA Journal*, Vol. 46, pp. 1921-1931, (2008).
21. Sosa, R., D'Adamo, J. and Artana, G., "Circular cylinder drag reduction by three-electrode plasma actuators", *Journal of Physics*, Vol. 166, No. 012015, (2009).
22. Tabatabaeian, S., Mirzaei, M., Sadighzadeh, A., Damideh, V. and Shadaram, A., "Experimental investigation of the effects of various plasma actuator configurations on lift and drag coefficients of a circular cylinder including the effects of electrodes", *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol. 25, pp. 311-324, (2012).
23. Kopiev, V.F., Belyaev, I.V., Zaytsev, M.Yu., Kazansky, P.N., Kopiev, V.A. and Moralev, I.A., "Noise control of a flow around a cylinder using high-frequency dielectric barrier discharge plasma actuators", *Acoustical Physics*, Vol. 61, pp. 178-180, (2015).
24. Kim, D. and Wang, M., "Large-eddy simulation of flow over a circular cylinder with plasma-based control", *47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, No. 1080, Orlando, Florida, (5 - 8 January 2009).
25. Skote, M., Ibrahim, I.H. and Lewis, R., "Utilizing the L-PSJA for controlling cylindrical wake flow", *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, Vol. 26, No. 5, (2016).